

# 多 Agent 系统合作与协调机制研究综述 \*

肖正 吴承荣 张世永

(复旦大学计算机与信息技术系 上海 200433)

**摘要** 多 Agent 间的合作和协调机制是多 Agent 系统理论的核心问题之一。本文按照协调在合作过程中发生的位置进行分类讨论,结合实例阐述了经典的多 Agent 系统合作与协调机制的主要原理、适用范围,旨在分析总结现有的多 Agent 合作和协调机制,为未来的开放、异构、动态环境下多 Agent 合作与协调机制的发展趋势和进一步研究的方向提供参考。

**关键词** 多 Agent 系统,分布式人工智能,系统合作,系统协调

## A Survey of Cooperation and Coordination in Multi-agent System

XIAO Zheng WU Cheng-Rong ZHANG Shi-Yong

(Department of Computing and Information Technology, Fudan University, Shanghai 200433)

**Abstract** Cooperation and coordination have been a key topic in multi-agent system theory. This paper is structured according to when coordination happens in cooperative process, providing an overview of typical cooperative and coordinative mechanisms referring to two examples. By analyzing these mechanisms, it aims to guide the future research on cooperation and coordination of multi-agent system under open, heterogeneous, and dynamic environment.

**Keywords** Multi-agent system, Distributed artificial intelligence, System cooperation, System coordination

### 1 引言

上个世纪 80 年代,分布式人工智能(Distributed Artificial Intelligence, DAI)作为一个新的研究领域引起越来越广泛的兴趣和重视。DAI 的早期研究为多 Agent 系统(Multi-Agent System, MAS)提供了很好的技术基础。80 年代后期,多 Agent 系统成为分布式人工智能研究中继分布式问题求解(Distributed Problem Solving, DPS)之后的主要研究对象。多 Agent 系统的研究包括智能 Agent 的体系结构,多 Agent 之间的交互、协作、通信,以及后来出现的 Agent 对周围环境和与其他 Agent 行为的学习等。其中 Agent 的合作与协调是多 Agent 系统广泛应用于现实世界需要解决的首要问题,是体现多 Agent 社会性、灵活性,发挥多 Agent 系统优势的关键。

多 Agent 系统由于其健壮、可靠、高效、可扩展等特性,在现实世界中有着广泛的应用前景。例如,多 Agent 技术可以应用于软件工程领域<sup>[4]</sup>,为软件开发提供了一个新颖和极具前景的范例。这也是程序设计从面向机器向面向真实世界抽象逼近的结果。一个复杂的软件系统可以看成是由许多自治 Agent 组成,这些 Agent 具有独立的功能和属性,它们之间通过交互协作来实现整个软件系统的功能。如航空运输控制系统可以采用面向 Agent 的软件开发风格,利用 Agent 模拟飞行器、机场等现实世界的实体。再如,随着 Internet 成为一个高度分布的开放系统,异构的网路节点随时加入或退出,网络拓扑结构不断变化,充斥于 Internet 的信息呈爆炸式增长,多 Agent 技术可以用来设计实现代表用户利益的 Agent,在这样的高动态开放环境下通过与其它 Agent 主动交互达到用户的目标,如电子商务<sup>[6]</sup>、Internet 信息检索等问题<sup>[7]</sup>。此外,多

Agent 系统还是分布式感知等地理空间分散应用的自然实现方式,如分布式车辆监视试验床(DVMT)<sup>[8]</sup>。多 Agent 系统还可以应用于社会仿真、虚拟现实、计算机游戏等领域<sup>[3,5]</sup>。

在以上诸多应用中,任何一个系统都离不开 Agent 间的合作与协调。合作和协调能力是多 Agent 系统的基础,也是整个系统智能性的体现。随着多 Agent 系统应用的深入,其应用的环境变得越来越复杂,应用环境所表现出的开放性和动态性对多 Agent 系统的影响日益突显。此外,未来一个实际应用很可能由不同个人或组织设计的 Agent 参与,这些 Agent 具有不同的利益和目标、不同的推理和反应能力。这些特征给多 Agent 系统带来了新的挑战。本文分析总结了现有的多 Agent 合作和协调机制,提出未来的开放、异构、动态环境下多 Agent 合作与协调机制的发展趋势和进一步研究的方向。

### 2 多 Agent 系统的概念及特点

在有关 Agent 的研究中,什么是 Agent 还没有得出统一的定义。目前最经典和广为接受的是 Wooldridge 和 Jennings 的定义<sup>[9]</sup>: Agent 是处在某个环境中的计算机系统,该系统有能力在这个环境中自主行动以实现其设计目标。常讨论的软件 Agent 就是符合以上定义的外延。由多个符合上述定义的、自治的、具有交互能力的 Agent 组成了一个 Agent 的社会。各个 Agent 可能有不同的目标、知识和能力,它们之间可能是合作的,也可能是竞争的。在现实中,一个 Agent 所能完成的任务是非常有限的。对于复杂的应用,Agent 不仅需要和其他 Agent 交互,可能还需要跟人或者机器人等智能体(根据 Russell 和 Norvig<sup>[10]</sup>的定义,亦属于 Agent 范畴)交互。这

\* 国家重点基础研究发展计划“973”计划(2005CB321906)资助。肖正 博士研究生,研究方向为多 Agent 系统、分布式人工智能、计算机网络技术;吴承荣 副教授,研究方向为计算机、网络安全;张世永 教授,博士生导师,研究方向为高性能计算机网络、网络安全、移动 Agent 技术。

样,在 Agent 社会中,多个 Agent 由于共同的目标,或需要其他 Agent 给予协作等原因彼此联系、相互关联,形成一个松耦合的网络,即所谓的多 Agent 系统。从广义来讲,整个 Agent 社会也可以看作是一个多 Agent 系统。

分布式人工智能早期的研究(即 DPS)隐含了合作 Agent 彼此是“仁慈的(benignant)”的假设,即只要有请求就提供帮助。而对照人类社会,更一般的假设是一个自治 Agent 会根据自身的目标、能力和环境,决定接受或拒绝来自其他 Agent 的请求。这样的 Agent 也称作自利的 Agent(self-interested agent)。这种由自利 Agent 组成的多 Agent 系统是目前 MAS 的主要研究对象。在这样的多 Agent 系统中,不能事先假定 Agent 共享一个共同的目标,因为通常是由不同的个体或组织进行这些 Agent 的设计,并用来代表各自的利益。就像人类社会一样,一个 Agent 的利益可能会和其他 Agent 的利益发生冲突。尽管 Agent 之间存在潜在的利益冲突,但最终会像人类社会一样,为了实现各自的目标需要进行合作。这样的多 Agent 系统具有以下的特点:

- (1) Agent 知识是局部的。即对整个环境或其他 Agent 只有不完全的了解——非全知的。
- (2) Agent 能力是有限的。即每个 Agent 都不可能单独完成所有任务,必须同其他 Agent 合作——非全能的。
- (3) Agent 是异构的。这包括两个方面;其一,Agent 设计的异构,不同的 Agent 具有不同的能力(有限理性)。其二,Agent 目标的异构,不同 Agent 代表了设计者不同的利益。
- (4) MAS 是分布式系统。MAS 缺乏全局中心化的控制,各个 Agent 的计算是异步的。
- (5) MAS 是动态的系统。环境内在的因素或其他 Agent 的行为导致环境的变化,因此 Agent 的行为可能使环境到达非期望的状态。
6. MAS 是开放的系统。随着应用的需要,Agent 可以随时加入或退出。

上述特点中前 3 个是从单个 Agent 的角度出发得到多 Agent 系统的特点,而后 3 个反映了整个多 Agent 系统的性质。最后一个不是 MAS 所必需的,但随着应用的扩大,开放性将愈来愈普遍,所以仍将其作为 MAS 的特点列出。由于 Agent 不是全能的,因此为了实现自己的目标,需要同其他 Agent 合作。但 Agent 的非全知、异构性以及 MAS 系统的非集中控制、动态性和开放性不可避免地造成 Agent 信念意图、行为规划上的冲突、部分结果的不一致,给多 Agent 系统合作与协调机制的设计带来了挑战。

### 3 合作与协调应用场景及相关问题

分布式车辆监测测试床(DVMT)<sup>[8]</sup>是最早和最著名的多 Agent 测试床之一。一组传感器负责一定范围内车辆的监测,将来自多组传感器的数据综合,消除输入信息和部分解之间的不一致,从而恢复出车辆的轨迹。图 1 给出了一个输入信息不一致的示例。小方框代表 Agent 感知到车辆的位置,右边的数字是采样的时刻。方框的颜色表示 Agent 对采样数据准确度估计,颜色愈浅,结果愈不准确。

DVMT 是一个简单的多 Agent 应用实例,不存在 Agent 任务规划以及行为选择的问题。下面介绍的交通运输系统体现了多 Agent 系统中在任务规划和行为选择上的冲突和不一致。Agent  $A_1$  负责城市  $v_1$  和  $v_2$  之间的货物运输,而 Agent  $A_2$  负责  $v_3$  和  $v_4$  之间的货物运输。现在  $v_1$  和  $v_4$  各有两批货

物  $p_1, p_2$  需要运输到城市  $v_3, v_2$ 。D 是仓库。这包含 4 个子任务,如图 2(a)所示。图 2(b)反映了它们之间的约束关系。如  $t_3$  必须在  $t_1$  任务完成后才能执行。当这两个 Agent 需要合作完成运输任务时,可能出现以下协调问题:假设每个 Agent 都计划先从 D 处运货物到目的地,如图 2(c)所示。显然这时两个 Agent 都没有货物可以运输,而出现死锁的状况。由每个 Agent 单独制定的计划直接组合成的联合计划可能是不可行的。

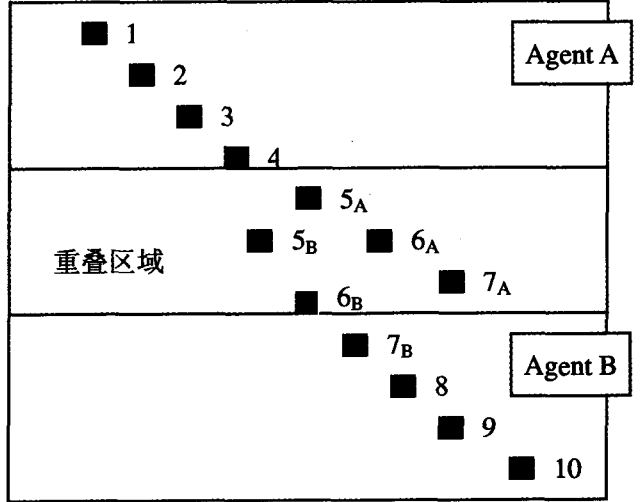


图 1 分布式车辆监测感知信息不一致示例

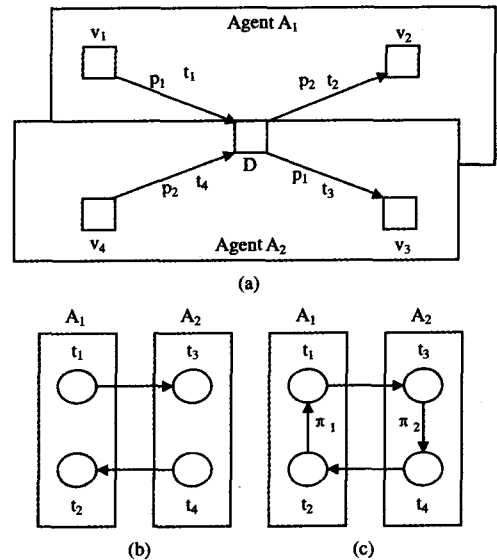


图 2 交通运输系统任务规划示例

上例,两货车  $A_1, A_2$  可能在单行道路口相遇,谁先通过引发了新的冲突,这在任务规划中预先解决是不现实的。这时,为了竞争有限资源,就需要引入协调机制。这类协调可以抽象为 Agent 之间进行的一场博弈。不同的问题域可能产生不同的博弈模型。图 3 反映了本例的一个博弈模型。Agent 从(通过、等待)两个行为中选其一。括号中的数值代表了 Agent 的效用(支付),即对应行为带来的获益。一个理性的 Agent 是要使其期望效用最大化。

以上三个场景,体现了多 Agent 合作过程中 3 个主要的需要彼此协调的地方:任务分配;对任务的规划;行动的选择。这 3 个方面不是孤立的,而是彼此联系的。比如任务的规划决定了可能的行动集。下节将详细讨论这 3 个方面经典的合

作与协调机制。

		Agent A <sub>2</sub>	
		通过	等待
Agent A <sub>1</sub>	通过	(-1, -1)	(1, 0)
	等待	(0, 1)	(0, 0)

图3 交通运输系统行为选择示例

#### 4 合作与协调机制

在多 Agent 系统中,需要有效的合作与协调机制来产生可行的联合规划,做出恰当的行为选择,得到一致满意的最终解。解决冲突或不一致,主要有以下 3 种处理方式。结合上述实例,对有代表性的合作与协调机制分别讨论之。

##### 4.1 任务执行前的合作与协调

任务执行前的合作与协调是指尽可能避免或消除任务执行前预期到的冲突。这些冲突可能是由于任务分解阶段产生的,本文不讨论如何合理进行任务分解。我们假设任务已经分解成一组子任务。将子任务分配给 Agent,达到合作的目的,但合理的分配亦能起到消除或避免在执行过程中出现冲突的效果。比如在 DVMT 中,一方面要使合作的 Agent 能覆盖整个区域,同时尽可能减少相邻 Agent 之间的重叠区域,避免一部分冲突。人类社会中的协商、拍卖、辩论等机制能够给任务分配带来一些有益的启示。

1980 年,Smith 和 Davis<sup>[11]</sup>提出的合同网协议(CNET)是通过任务共享实现有效合作的高级协议,亦是协商方法应用于多 Agent 系统有代表性和有影响力的合作与协调机制之一。他们从公司组织和投标人的合同产生过程引发这样的灵感:产生任务的 Agent 在协议中被称作管理者(manager),它向其他 Agent 广播任务通知。接收到任务通知的节点根据任务要求自己的能力和知识、预期收益等决定是否投标。当 Agent 发现一个合适的任务时,向管理者提交一个投标(bid)。管理者会收到许多这样的投标,基于投标的信息,对一个任务通知做出反应,选择最合适的 Agent 来完成任务,这些 Agent 就是合同人(contractor)。同样,合同人还可以作为管理者将子任务再进行分配。合同网协议通过管理者来协调各个合同人。在 DVMT 中,根据 Agent 的位置来决定合适的任务分布。

然而,在第二个实例中,两个 Agent 各自任务之间存在的依赖关系无法通过任务分配得到满足。在两个 Agent 的规划之上需要通过一定的协调得到可行的联合规划,即多 Agent 规划。对于多 Agent 规划,又可以分为集中式的多 Agent 规划和分布式的规划。

集中式规划:Georgeff<sup>[12]</sup>提出了一种算法,计划制订者可以得到一个由一些单个 Agent 生成的计划的集合,然后分析和识别潜在的交互冲突,比如竞争有限资源引发的冲突,将不安全的交互分组形成临界域,最后在计划中插入通信命令,达到适当的同步,从而产生无冲突的(但不必是最优的)多 Agent 计划。Georgeff 和 Lansky 对集中式规划做了进一步的研究<sup>[13]</sup>,比如对多 Agent 事件的替代表示等。

在本文第 2 节对多 Agent 系统的特性的描述中,可以发现多 Agent 系统中,不存在对整个系统和环境全知的单一节点。这使集中式规划遇到了困难,分布式规划也就应运而生。

分布式规划:由 Agent 组合作生成联合的计划。成员 A-

gent 是整体计划某方面的专家,并且可以完成整体计划的部分规划工作。然而,不是所有制订计划的 Agent 都参加任务的执行,它们的角色仅仅是产生有关的计划。Corkill<sup>[14]</sup>开发了一个基于 NOAH 的分布式层次规划器,为每一个节点提供其他节点规划的模型,通过明显的动作原语来同步计划的执行。Rosenschein 等<sup>[15]</sup>研究了 Agent 共享统一目标但拥有不同的本地信息的规划问题,他们利用逻辑方法,目标设为要证明的命题,本地信息代表公理,规划即是对命题的证明,Agent 之间通过交换命题最后收敛到一致的规划。基于逻辑的方法能得到较优的解,但计算花费大,缺乏实时性,不适用于动态环境。

多 Agent 规划另一个研究方向是建立基于队工作(Teamwork)的框架模型,由于已有这方面的综述文章<sup>[27,28]</sup>,本文不再讨论这一方法。

##### 4.2 任务进行中的合作与协调

这一类机制主要是处理在任务执行过程中不可预期的冲突或不一致。比如在开放多 Agent 系统中,无法事先确定一个节点何时加入和退出,也就不能预料将面临何种冲突。因此,在冲突发生时,才能做出快速合理的响应。根据有无通信,这类机制存在两个发展方向。

###### 4.2.1 无通信的合作与协调

在无通信的合作与协调机制中,经济学中决策论和博弈论是主要用到的理论工具。因为自利多 Agent 系统合作的过程可以看作是多个 Agent 之间的一场对弈,其他 Agent 行为的选择会影响自己的决策过程。如在第 3 节交通运输实例中两 Agent 相遇,其中某一 Agent 选择通过,则另一 Agent 需要选择等待,以防止撞车。因此,如果能够事先观察到其他 Agent 的动作,则 Agent 会选择与它们无冲突的行为。但往往 Agent 无法知道其他 Agent 选择的动作,在多个 Agent 做出决策前,就需要预测与其相遇的 Agent 可能选择什么行为。

Jeffrey Rosenschein 及其同事是最早将博弈论引进多 Agent 系统的研究者,在其博士论文<sup>[21]</sup>中用博弈论分析了大量多 Agent 交互的场景,并且得出在没有通信的情况下某类场景能达成合作与协调的结论。在假设每个 Agent 是理性的前提下,博弈论为预测其他 Agent 可能选择什么动作提供了的理论基础。预测 Agent 的行为是有风险的,可以利用概率论和效用理论,依据决策论中期望效益最大化的思想来决定 Agent 的行为。但经典的决策理论并没有考虑多 Agent 环境下其他 Agent 行为的影响,而只是从自身行为对环境状态的影响来做出决策。Gmytrasiewicz 和 Durfee 将决策论与博弈论结合得到一种变体方法<sup>[22]</sup>:设有两个 Agent A 和 B, A 根据拥有的对环境和 B 的本地知识得到一个迭代的树型结构,第二层是在根节点的博弈模型下 A 预测 B 与自己的可能博弈模型和概率分布,第三层是 A 预测在第二层博弈模型下 B 预测 A 与自己博弈模型及概率分布,……。自下向上概率分布向量与博弈支付矩阵相乘,最终得到 A 的可能动作的概率分布。

在某些博弈中,存在多个均衡的策略组合。如在图 3 给出博弈模型(通过、等待)和(等待、通过)都是均衡的策略组合。因此,这种情况下无法预测其他 Agent 的行为。为了在 Agent 之间进行协调,一种方案是采用协商的办法,如在下面有通信的合作与协调机制中介绍的辩论等。另一种方案是利用 Agent 社会法律。所谓社会法律即事先或动态形成的对

Agent 有约束力的规则。如果规定右边的车先通过,则上述两策略组合中只有一个符合该规范。Shoham 和 Tennenholtz<sup>[23,24]</sup>等人研究了社会法律产生的问题。

#### 4.2.2 有通信的合作与协调

通信是当冲突发生时双方或多方进行协商,达成一致有效和常见的手段。通过交互彼此的信念和意图,了解彼此的态度,从而得到最优或者次优的解决方案。在囚徒困境的博弈中(如图 4 所示),如果两个 Agent 没有通信,按照博弈论每个 Agent 是理性的假设,则两个 Agent 会选择均衡策略(坦白、坦白)。显然,这个策略不是帕累托(Pareto)最优的,按照常理不难看出,策略(抵赖、抵赖)是最佳的选择。因此,为了得到最优的冲突解决方案,通信是有重要意义的。

		Agent A <sub>2</sub>	
		坦白	抵赖
Agent A <sub>1</sub>	坦白	(2, 2)	(5, 0)
	抵赖	(0, 5)	(3, 3)

图 4 囚徒困境博弈

这一范畴内经典的机制有部分全局规划 PGP (partial global planning)<sup>[18]</sup>。其主要原理是:为了达到关于问题求解过程的共同结论,合作的 Agent 需要交换信息。规划是部分的,因为系统不能产生整个问题的计划。规划是全局的,因为 Agent 通过局部规划的交换和合作,能得到问题求解的全局视图,进而形成全局计划。详细过程包括 3 个迭代阶段:

- (1) 每个 Agent 决定自己的目标,并且为实现目标产生短期的规划;
- (2) Agent 之间通过信息交换,确定目标和规划的交换;
- (3) 为了更好地协调它们各自的动作,Agent 要修改局部的规划。

部分全局规划与多 Agent 规划不同之处在于,PGP 中节点只需在当前对环境和其他 Agent 的知识和认知下做出最好的规划,而不像在多 Agent 规划中,需要对整个系统有一个完全的了解。PGP 通过不断的规划、交换、修改,而产生当前状态下合适的行为。

此外,有研究者将部分全局规划与 FA/C(4.3 小节介绍)结合,以 PGP 作为元级结构来控制 Agent 在什么时候,应该与哪些 Agent 交互部分解。

由于基于对策论达成一致的方法存在不能说明和改变观点等不足,因此出现了基于辩论的协商方法<sup>[19]</sup>。多 Agent 情形下辩论的基本原理是:Agent 试图使其他 Agent 确信某一情况的状态为真(或者假),其中包含 Agent 对提出的命题是支持或反对的理由,以及对这些辩论的可接受性的检验。这一协调方法中有代表性的是 Fox 等提出的基于逻辑的辩论<sup>[20]</sup>。

#### 4.3 缓慢退化的合作与协调

前两类合作与协调机制都采用积极主动的方式来处理不一致和冲突,通过通信、同步等方法来更新和保证 Agent 具有一致的知识。而缓慢退化的合作与协调则容许 Agent 的本地信息和对目标理解存在一定程度的不一致,甚至允许某些软/硬件错误的存在,只需最终结果保持一致。该类机制的假设或出发点是:现实中有时候要求每个 Agent 的信息都是准确无误或一致的是困难的,甚至是不可能。就像 DVMT 中,传感器的输入信息或多或少是不准确的。Lesser, Corkill 和 Er-

man 是研究这类合作与协调机制的先驱。他们提出了功能精确合作(functionally accurate/cooperative, FA/C)方法<sup>[16,17]</sup>。

FA/C 方法的灵感主要来自基于知识的人工智能领域解决由于不准确的数据输入和知识近似等引起的不确定性的研究。通过反复交换各抽象层次上部分试探性结果,不断更新 Agent 的部分解,最终构造一个一致完整的解。节点利用当前的信息尽力做所能做的,它的局部知识库不必是完整的、一致的和最新的,局部问题的解可能仅是部分的、尝试性的和不正确的。FA/C 方法不需要通信和同步来保证 Agent 知识的一致性和完整性,节省了网络带宽;同时采用 FA/C 方法的多 Agent 系统由于能够容许一定程度的不一致而更健壮,在处理器、传感器和通信失败的情况下仍能正常运行。但其代价是部分解多次交换和更新使得本地解的计算变得更复杂。

目前 FA/C 系统具有以下特征:①问题求解不是严格地限制于特定的事件序列,求解的进展是机会主义的(即不严格遵守预先确定的次序,而是利用一切可能出现的有利机会)和渐进的(即逐渐地修补子问题,组合成解);② Agent 通过交换高级的中间结果,而不是交换原始数据进行通信;③当交换部分结果,并与其他的部分解比较时,隐含解决了不确定性和不一致性,而不是在问题求解的开始或结束;④解不限制于一个求解路径,这样如果一个失败,还存在其他完成同一目标的方法,从而使得系统在克服局部的失败和问题求解的瓶颈方面具有健壮性。

FA/C 方法适合于数据不能划分,需要参照其他 Agent 产生的部分解的应用。该方法在分布式翻译、分布式网络交通灯控制、分布式规划 3 个应用领域得到应用和深入探讨。在文[17]中,FA/C 被应用于 DVMT 中,并且得到满意的结果。由于 FA/C 的应用领域还比较有限,因此该方法还需要进一步研究和扩展。

## 5 复杂环境下的合作与协调

在异构的、动态的和开放的复杂环境下,第 4 节讨论的合作与协调机制都存在不同程度的不适应。对于快速变化的环境,需要高效的合作与协调机制,因为过去某个时刻认为是一致的行为可能由于环境的改变而导致冲突的发生。像集中式规划需要大量的通信,而使其在效率方面不适合动态的环境。在合同网协议中动态性很难得到有效的管理,由于环境的变化,任务的重新分配降低了协作的效率,增加了网络负载。PGP/FA/C 由于复杂的本地控制、大量的计算开销,影响了效率的提高。开放、异构的环境要求合作与协调机制与具体的应用域无关,是一个通用的机制。合同网与具体应用相关,在异构环境下,合同网的应用变得困难。高效和通用成为异构的、动态的和开放的复杂环境下多 Agent 系统的合作与协调机制的设计所需要强化的两个重要方面。

多 Agent 系统的一个重要的应用和基本支撑环境就是计算机网络,而计算机网络通信系统是一个典型的复杂环境。目前的各种计算机网络通信系统往往是异构的,其中存在各种类型与性质的子系统。在这种异构性的计算机网络通信系统中,需要实现异构的软、硬件环境中进行异地资源共享、远程相互合作通信、异步相互操作等功能。这些功能的完成需要大量的不同种类的 Agents 分工合作、相互协调才能实现。此外,计算机网络的发展呈现出的一个新的特点,那就是网络的动态性。在动态网络中,网络的体系结构、设备、结点之间的关系和应用是复杂多变的,随着越来越多的移动设备和相

关应用不断加入传统的网络中,网络的动态性和不可确定性大大提高。在动态网络中,最常见的就是网络拓扑的动态变化。在网络的运行中,拓扑结构经常变化,不断有新的结点加入或者现有的结点退出,还有结点之间的连接关系也会发生改变。结点之间的连接的变化既包括物理的变化也包括逻辑的改变。目前所研究的 Ad-hoc 网络与 Sensor 网络其实就是一种典型的动态拓扑网络。另外,当前的传统网络的拓扑结构也是经常变化的。因此,建立适应网络拓扑变化的合作与协调模型<sup>[25,26]</sup>是多 Agent 系统应用于复杂环境首先面临和需要解决的基本问题之一。

**结束语** 多 Agent 系统(MAS)是综合社会学、经济学和计算机科学等多门学科的交叉研究领域。合作与协调一直是多 Agent 系统研究的关键技术之一。然而,目前提出的一些合作和协调机制可能比较偏向于某一类应用,缺乏通用性。特别是在未来动态、开放、异构的环境下,任何一类合作与协调机制可能都不能解决所有的冲突和不一致。合作与协调需要以上 3 类机制的充分结合。通过事前规划,充分考虑子任务之间的约束依赖关系,尽可能减少冲突和不一致出现的可能性。复杂的环境可能在规划执行中出现突发状况,这时需要多个 Agent 的协商交互,从而达到协调一致的行为。对于某些不一致,可以采用缓慢退化的合作与协调,容忍一定程度的不一致,而减少通信和同步等方面的耗费。此外,对于大规模的多 Agent 系统,上述机制在效率方面都存在明显不足之处。因此,结合人工智能和分布式系统最新的研究成果,综合 3 类机制的优点,开发高效的、通用的合作与协调机制是未来的研究目标和方向。

## 参 考 文 献

- Pieter B, Adriaan M, Jeroen Y, et al. Coordinating self-interested planning agent. *Autonomous Agents and Multi-Agent System*, 2006, 12: 199~218
- Javier V S, Virginia D, Frank D. Organizing multi-agent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent System*, 2005, 3: 307~360
- Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent System*. John Wiley & Sons, 2002
- Sycra K. Multiagent systems. *AI Magazine*, 1998, 19(2): 79~92
- Jennings N R, Sycra K, Wooldridge M. A roadmap of agent research and development. *Autonomous Agents and Multi-Agent System*, 1998, 1(1): 7~38
- Noriega P, Sierra C. *Agent Mediated Electronic Commerce*. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1571, Springer, 1999
- Kuokka D R, Harada L P. Issues and extensions for information matchmaking protocols. *International Journal of Cooperative Information System*, 1996, 5 (2-3): 251~274
- Davis R, Smith R G. Negotiation as a metaphor for distributed problem solving. *Artificial Intelligence*, 1983, 20: 63~100
- Wooldridge M, Jennings N R. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 1995, 10 (2): 115~152
- Russell S J, Norvig P. *Artificial Intelligence: a Modern Approach*. 2nd edition. Prentice Hall, 2003
- Smith R G, Davis R. Frameworks for cooperation in distributed problem solving. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1980, 11 (1)
- Georgeff M. Communication and interaction in multi-agent planning. In: *National Conference Artificial Intelligence*, 1983. 125~129
- Georgeff M. A theory of action for multi-agent planning. In: *National Conference Artificial Intelligence*, 1984. 121~125
- Corkill D D. Hierarchical planning in a distributed environment. In: *National Conference Artificial Intelligence*, 1979. 168~179
- Rosenschein J S, Genesereth M R. Communication and cooperation among logic-based agents. In: *Proceedings of Computer Communication*, 1987. 594~600
- Lesser V R. A Retrospective View of FA/C Distributed Problem Solving. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 1991, 21 (6): 1347~1362
- Lesser V R, Corkill D D. Functionally accurate, cooperative distributed systems. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 1981, SMC-11: 81~96
- Durfee E H. Planning in distributed artificial intelligence. In: *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, 1996. 231~245
- Parsons S, Sierra C A, Jennings N R. Agents that reason and negotiate by arguing. *Journal of Logic and Computation*, 1998, 8 (3): 261~292
- Fox J, Krause P, Ambler S. Arguments, contradictions and practical reasoning. In: *Proceedings of the 10th European Conf on Artificial Intelligence*, 1992. 623~627
- Rosenschein J S. *Rational Interaction: Cooperation among Intelligent Agents*. [PhD thesis]. CA 4305. Computer Science Department, Stanford University, 1985
- Gmytrasiewicz P J, Durfee E H. Rational Coordination in Multi-agent Environments. *Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, 2000, 3: 319~350
- Shoham Y, Tennenholtz M. Emergent conventions in multi-agent systems. In: *Proceedings of Knowledge Representation and Reasoning*, 1992. 225~231
- Shoham Y, Tennenholtz M. On social laws for artificial agent societies: off-line design. In: *Proceedings of Knowledge Representation and Reasoning*, 1992. 225~231
- Jiang Y C, Jiang J C. A Multi-agent Coordination Model for the Variation of Underlying Network Topology. *Expert Systems with Applications (Elsevier Science)*, 2005, 29(2): 372~382
- Jiang Y C, Xia Z Y, Zhang S Y. An Adaptive Adjusting Mechanism for Agents Distributed Blackboard Architecture. *Microprocessors and Microsystems*, 2004, 29(1): 9~20
- 王玥,陈世福. 基于多 Agent 的 Teamwork 研究综述. *计算机科学*, 2002, 29(10): 38~42
- 李静,陈兆乾,陈世福,等. 多 Agent Teamwork 研究综述. *计算机研究与发展*, 2003, 40(3): 422~429
- 李海刚,吴启迪. 多 Agent 系统研究综述. *同济大学学报*, 2003, 31(6): 728~732
- 李庆华,张红君. 开放 Agent 社会的框架模型研究综述. *计算机科学*, 2005, 32(7): 137~141
- Jin L jie, Casati F, Sayal M, et al. Load Balancing in Distributed Workflow Management System. In: *Proceedings of the 2001 ACM Symposium on Applied Computing*. New York, USA. ACM Press. 2001. 522~530
- Oinn T, Addis M, Ferris J, et al. Taverna: A tool for the Composition and Enactment of Bioinformatics Workflows. *Bioinformatics Journal*, 2004, 20(17): 3045~3054
- Afsarmanesh H, Belleman R, Belloum A, et al. VLAM-G: A Grid-based Virtual Laboratory. *Scientific Programming: Special Issue on Grid Computing*, 2002, 10(2): 173~181
- Zhao Z, Belloum A, Yakali H, et al. Dynamic Workflow in a Grid Enabled Problem Solving Environment. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Computer and Information Technology (CIT2005)*. Shanghai, China. IEEE Computer Society Press, 2005. 339~345
- Kaster D S, Mediros C B, Rocha H V. Supporting Modeling and Problem Solving from Precedent Experience: the Role of Workflows and Case-Based Reasoning. *Environmental Modeling & Software*, 2005, 20: 689~704
- 顾大可,俞勇. 一个基于案例的动态 workflow 模型. *上海交通大学学报*, 2001, 35(9): 1290~1292

(上接第 124 页)

- Bogia D P, Kaplan S M. Flexibility and Control for Dynamic Workflows in the Worlds Environment. In: *Proceedings of conference on Organizational Computing Systems*. New York, USA, ACM Press, 1995. 148~159
- Jorgensen H D. Interaction as a Framework for Flexible Workflow Modelling. In: *Proceedings of the 2001 International ACM SIGGROUP Conference on Supporting Group Work*. Singapore, ACM Press, 2001. 32~41
- Bubak M, Gubala T, Kapalka M, et al. Grid Service Registry for Workflow Composition Framework. In: *Proceedings of International Conference on Computational Science*. LNCS 3038, Springer, 2004. 34~41
- Caragea D, Syeda-Mahmood T. Semantic API Matching for Automatic Service Composition. In: *Proceedings of the 13th International World Wide Web Conference on Alternate Track Papers & Posters*. New York, USA, ACM Press, 2004. 436~437
- Baggio G, Wainer J, Ellis C. Applying Scheduling Techniques to Minimize the Number of Late Jobs in Workflow Systems. In: *Proceedings of the 2004 ACM Symposium on Applied Computing*. New York, USA, ACM Press, 2001. 1396~1403